

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.003>

## ANALIZA UTICAJA STRATEGIJA ALOKACIJE ODREDIŠTA I VELIČINE FLOTE AUTONOMNIH MOBILNIH SORTIRNIH ROBOTA NA PROIZVODNOST PRIMENOM SIMULACIONOG MODELA U FLEXSIM-U

Nenad Bjelić, Nemanja Golubović  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,  
n.bjelic@sf.bg.ac.rs, n.golubovic@sf.bg.ac.rs

**Rezime:** *Intenzivan tehnološki razvoj na poljima hardvera i softvera doveo je do pojave i sve intenzivnijeg korišćenja autonomnih mobilnih robota u realizaciji unutrašnjih robnih tokova. Postojanje efikasnih sortirnih sistema je preduslov za uspešnu distribuciju robe do krajnjeg korisnika, a ono je zasnovano na donošenju što je moguće boljih upravljačkih odluka. U tom smislu, u ovom istraživanju su analizirani rezultati funkcionisanja sortirnog sistema sa predefinisanim prostornim izgledom, baziranog na upotrebi autonomnih mobilnih robota. Posmatrano je funkcionisanje sistema u kombinacijama tri pravila alociranja odredišta na izlazne lokacije sistema, tri strukture odredišnih lokacija u toku i različite veličine flote robota. Sistem je modeliran primenom simulacionih modela razvijenih u softverskom paketu Flexsim, a analizom rezultata je stečen dublji uvid u očekivano ponašanje sistema pod posmatranim uslovima.*

**Ključne reči:** *autonomni mobilni roboti, simulacija, sortiranje, alokacija*

### 1. Uvod

Intenzivni tokovi robe sa sve kraćim vremenima isporuke i sve širim asortimanom su kao potrebu nametnuli korišćenje sortiranja kao aktivnosti koja, iako dodatna operacija koju je potrebno izvršiti nad robom, rezultuje efikasnom distribucijom proizvoda do krajnjeg korisnika. U skladišnim sistemima sortiranje omogućuje realizaciju zonskog komisioniranja koje podrazumeva manje kretanje komisionera između lokacija izuzimanja robe te i bržu selekciju robe. U industriji ekspres pošiljaka hub-and-spoke konfiguracija mreže, tj. iskorišćenje prednosti ekonomije obima u transportu od i ka hub-u ne bi bilo moguće bez postojanja efikasnog sortirnog sistema. Do skora, konvejni tip sortirnih sistema je bio jedina opcija i podrazumevao je primenu raznih kombinacija valjkastih i trakastih transportera, kliznica, pomoćnih sredstava za istovar sa sistema... Ovakvi sistemi se odlikuju velikim brzinama kretanja robe, ali i malom fleksibilnošću, kao i znatnom

po površinom neophodnom za implementaciju. Iz tog razloga, svaka promena konfiguracije postojećeg sistema ili prilagođenje kapaciteta, zahteva znatna sredstva, resurse i vreme tokom kojeg nastaje prekid u funkcionisanju postojećeg sistema. Sa druge strane, intenzivan tehnološki razvoj u poslednjih 15-ak godina [1] na poljima hardvera (senzora, baterija [2], ...) i softvera, pre svega primene veštačke inteligencije u raznim segmentima funkcionisanja [3], doveo je do pojave i sve intenzivnijeg korišćenja autonomnih mobilnih robota - AMR (engl. Autonomous Mobile Robots). Usled svoje prilagodljivosti AMR-ovi su našli primenu u različitim aktivnostima iz oblasti rukovanja materijalima. Verovatno najpoznatije je korišćenje Kiva robota u okviru kompanije Amazon, koji se već desetak godina koriste za prinošenje komisioneru mobilnih polica sa robom kako bi odgovarajuća količina robe bila izuzeta i otpremljena kupcu. Drugi primer korišćenja ovakvih robota u roba-ka-čoveku sistemu komisioniranja je Autostore sistem koji u velikom broju vertikalna skladišti robu u predefinisanim kontejnerima i u skladu sa porudžbinama vadi odgovarajuće kontejnere i prinosi ih komisionerima. Prednosti ovakvog načina skladištenja i rukovanja robom su doveli do toga da se jedan logistički provajder i iz Srbije odlučio za njega i uveo ga u svoje poslovanje pre par godina. Konačno, prednosti AMR-ova su dovele do toga da su našli svoje mesto i u oblasti sortiranja ekspres pošiljaka. Tako je na periferiji Istambula u prvoj polovini 2023. u rad pušten najveći sortirni sistem za pošiljke do 10kg zasnovan na AMR-ovima[4]. Kapacitet od oko 45000 pošiljaka na sat je obezbeđen radom 120 AMR-ova koji sa 5 ulaznih tačaka sortiraju robu na 700 izlaznih tačaka.

Iako predstavljaju novu opciju za realizaciju pretovarnih zadataka funkcionisanje ovakvih sistema podrazumeva donošenje odluka koje su, u svojoj prirodi, identične odlukama koje karakterišu i već postojeća tehnološka rešenja. Naime, pitanja kao što su koliko je potreban broj sredstava, koji pretovarni kapacitet je moguće ostvariti, kako alocirati robu po prostoru, koje algoritme rutiranja koristiti, u kojim tačkama slobodna vozila čekaju na zadatke, kako zonirati prostor itd., su sastavni deo projektovanja i upravljanja i sistemima zasnovanim na AMR-ovima. Naravno, u davanju odgovora na postavljena pitanja, tj. rešavanju adekvatnih problema u obzir je neophodno uzeti specifičnosti funkcionisanja svakog posmatranog sistema.

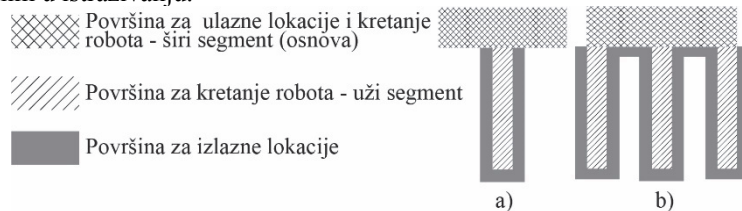
U tom smislu, cilj ovog rada je da se na konkretnom primeru layouta sortirnog sistema zasnovanog na AMR-ovima ispita uticaj kombinacije strategija alokacije odredišta na izlazne lokacije sistema, strukture odredišta u ulaznom potoku robe i broja raspoloživih AMR-ova na časovni kapacitet sistema. U tom cilju, rad je organizovan u 5 poglavlja. U drugom poglavlju je opisan posmatrani problem uz kraći pregled relevantne literature. U trećem je predstavljen simulacioni model. Svi detalji simulacionog eksperimenta, uključujući i najbitnije rezultate su dati u poglavlju četiri. Na kraju su data zaključna razmatranja i predstavljeni dalji planovi vezani za istraživanja na razmatranu temu.

## **2. Opis posmatranog problema**

Proces sortiranja u sistemima sa AMR-ovima podrazumeva nezavisan rad svakog robota. U opštem slučaju svaki od AMR-ova prolazi kroz sledeće faze u radu: preuzimanje pošiljke na nekoj od utovarnih lokacija, transport jedinice robe do izlazne lokacije, istovar jedinice na izlaznoj lokaciji (u kontejner, džak, kutiju..) i konačno povratak na utovarnu lokaciju radi utovara nove jedinice tereta. Naravno, projektovanje i upravljanje ovakvim sistemima je izuzetno kompleksno jer podrazumeva čitav niz odluka, koje se donose na raznim hijerarhijskim nivoima i imaju različit nivo uticaja na efikasnost sortiranja. Neke

od njih su: način utovara (ručno ili primenom pomoćnih robota), definisanje broja i lokacija utovarnih lokacija, upravljanje dopunama baterija (broj lokacija za dopunu, lokacije, tehnologija dopune...), način definisanja putanja robota, regulacija blokada vozila, alokaciju odredišta po izlaznim lokacijama... U ovom istraživanju je cilj bio ispitivanje uticaja načina alokacije odredišta po izlaznim lokacijama, u zavisnosti od strukture odredišta robe za sortiranje, uz respektovanje veličine flote AMR-ova za predefinisani prostorni raspored (engl. Layout) prostora u kojem sortirni sistem funkcioniše.

U pogledu layout-a treba reći da je uzet široko rasprostranjen layout koji se odlikuje mogućnošću pozicioniranja velikog broja izlaznih lokacija, ali i smanjenim manevarskim prostorom za kretanje robota na pojedinim delovima. Konkretno, posmatrani tip layout-a je poznat kao T-layout usled sličnosti sa simbolom slova „T“ (slika 1a). Operativni prostor se sastoji iz: šireg segmenta (osnove), u okviru kojeg se pozicioniraju ulazne lokacije i lokacije za punjenje baterija; i užih segmenata, normalno postavljenih u odnosu na osnovu, duž kojih su pozicionirane izlazne lokacije, a po kojem se kreću roboti radi istovara robe u odgovarajuću izlaznu lokaciju. U slučaju potrebe za povećanjem broja izlaznih lokacija moguće je postavljanje više paralelnih užih segmenata (slika 1b), koje može pratiti i povećanje površine osnove u cilju povezivanja svih užih delova. Minimalna širina užeg dela je dve širine staze za kretanje robota, kako bi se omogućilo njihovo mimoilaženje, ali se u praksi sreću i slučajevi sa tri širine staze kako bi se stvorio i dodatni prostor radi minimizovanja ometanja i blokiranja robota, što je i slučaj sa layout-om razmatranim u istraživanju.



*Slika 1 Respektovani layout sortirnog sistema*

Uzimajući u obzir smanjenu manevarsku sposobnost AMR-ova na užim segmentima jasno je da razmeštanje odredišta robe po izlaznim lokacijama, tj. alokacija odredišta, može imati znatan uticaj na ometanje i eventualno blokiranje AMR-ova. Treba naglasiti da se u radu pod ometanjem podrazumeva povećanje vremena kretanja AMR-a do izlazne lokacije, u odnosu na situaciju kada bi AMR sam radio u posmatranom sistemu, a koje nastaje usled prisustva drugih AMR-ova. Sa porastom broja AMR-ova intenzitet ometanja raste, kao i šansa da AMR dođe u stanje blokade, pod kojim se podrazumeva situacija u kojoj dva ili više AMR-a ne mogu da odrede putanju kretanja do izlazne lokacije usled okruženosti drugim robotima u narednim vremenskim periodima. U tom smislu, jasno je da alokacija odredišta po izlaznim lokacijama može imati uticaj na nivo ometanja i blokiranja. Na primer, ukoliko se u jednom užem segmentu lociraju u grupi odredišta sa većom frekvencijom istovara jasno je da dolazi do veće šanse za ometanje i blokiranje robota. Pored toga, ukoliko se frekventnija odredišta lociraju na delu užeg segmenta bližem osnovi, a manje frekventne lokacije dalje od osnove, ometanje robota koji robu nose u manje frekventna odredišta će takođe imati veliku verovatnoću ometanja i blokade. U tom smislu, uticaj alokacije na efikasnost realizacije sortiranja je razmatran kroz primenu tri strategije. U prvoj, u daljem tekstu referenciranu kao strategija „1“ raspored odredišta po

izlaznim lokacijama je definisan na slučajan način. U drugoj, referenciranoj kao strategija „2“, frekventnija odredišta su raspoređena bliže ulaznoj lokaciji, dok su u strategiji „3“ takva odredišta raspoređena što dalje od ulazne lokacije.

Kao što je već napomenuto, frekventnost pojave nekog odredišta je jedan od parametara koji može uticati na problem alokacije odredišta. Njega je naročito potrebno razmatrati jer je on poznat pre otpočinjanja procesa sortiranja u dovoljno dugom vremenskom periodu. Uticaj tog parametra je u ovom istraživanju respektovan analizom tri grupe rezultata, dobijenim u tri praktične situacije zasnovanom za Pareto principu. U prvoj situaciji je posmatran slučaj kada je broj istovara po odredištima ravnomerno raspoređen, odnosno kada je 80% jedinica tereta potrebno istovariti u 80% izlaznih lokacija. U drugom slučaju je 80% istovara potrebno realizovati u 50% izlaznih lokacija (odredišta), dok treći slučaj posmatra situaciju u kojoj nekoliko odredišnih lokacija dominira u tokovima tako da je posmatran slučaj kada je 80% istovara potrebno realizovati u 20% odredišta. U skladu sa procentom brojem odredišta u koje se istovara 80% jedinica robe slučajevi su referencirani oznakama „80“, „50“ i „20“.

Konačno, uticaj broja AMR-ova na nivo ometanja i blokiranja je očigledan. Međutim, iako je jasno da sa povećanjem broja funkcionalnih robota efikasnost sistema neće rasti linearno, usled sve većeg uticaja ometanja, bez detaljne analize funkcionisanja sistema sa različitim brojem robota ne može se ni definisati granični broj AMR-ova nakon kojeg dodavanje dodatnog robota u najboljem slučaju ne povećava kapacitet sistema. U tom smislu, u ovom radu je razmatrano funkcionisanje različitog broja AMR-ova u sistemu sa opisanim layout-om u situacijama primene tri strategije alokacije odredišta i tri mogućnosti učešća najfrekventnijih odredišta u ukupnom broju jedinica robe za sortiranje.

Korišćenje AMR-ova u sortirnim sistemima, kao uopšte i u drugim pretovarnim operacijama, je relativno nov koncept, stoga je sasvim očekivano da je broj modela koji se koriste za upravljanje sistemima sa AMR-ovima izuzetno mali. U [3] autori daju pregled upravljačkih problema za funkcionisanja sistema koji su bazirani na AMR-ovima i oni uključuju probleme vezane za dimenzionisanje veličine flote, rutiranje, vremensko angažovanje, zoniranje, dispečiranje itd. Sa druge strane, specifičnost svakog posmatranog sistema zahteva individualistički pristup upravljanju ovakvim sistemima. Iz tih razloga, jasno je da je u upravljanju ovakvim sistemima simulacija široko zastupljena. U pomenutom preglednom radu, autori navode da je u problemima definisanja nivoa decentralizacije u sistemima sa AMR-ovima, definisanja broja i tipova robota, zoniranja i upravljanja resursima, simulacija korišćena u 32 od 56 razmatranih radova.

### **3. Simulacioni model sortirnog sistema**

Broj jedinica tereta prenetih od ulaznih do izlaznih lokacija u toku sat vremena rada je parametar u kome je sublimiran uticaj svih respektovanih karakteristika sortirnog sistema. Iz tog razloga [3] navode ovaj parametar kao najčešće korišćen u studijama sa simulacijom kao pristupom za rešavanje problema. U skladu sa tim i u ovom istraživanju je ostvareni kapacitet posmatran kao osnovni pokazatelj efikasnosti rada sistema u različitim konfiguracijama ulaznih postavki.

Po svojoj prirodi rad sortirnih sistema spadaju u grupu procesa koji se ne mogu nastavljati u beskonačnost. Drugim rečima karakterišu se radom koji uvek kreće od istih početnih uslova i završava se sortiranjem poslednje jedinice tereta. U skladu sa iznetim, kao i sa napisanim u [5]–[7] jasno je da je analizu podatka o ponašanju ovakvog sistema



moгу kretati. Uz to, mreža po kojoj se kreću roboti je podeljena na segmente koji mogu sadržati samo po jedan AMR u jednom trenutku. Odabir niza segmenata po kojima će se kretati roboti na putu od ulazne do izlazne lokacije, tj. definisanje putanje je realizovano primenom široko implementiranog A\* ruting algoritma ([1], [8], [9]), koji je sastavni deo istoimenog alata, a po kojem je alat i dobio ime. AMR-ovi se kreću po poljima ortogonalnim kretanjem uz rotacije od 90 stepeni na svakoj promeni pravca kretanja. Vreme okretanja robota je parametar koji se zadaje u implementiranom A\* alatu..

Nakon stizanja do ciljane izlazne lokacije kretanjem po A\* mreži segmenata, u zavisnosti od odnosa potrebnog i trenutnog usmerenja robota vrši se okretanje robota u željeni pravac i istovar jedinice tereta, tj. robot se na mestu izlazne lokacije zadržava koliko je to predviđeno tehnološki karakteristikama sistema. Nakon istovara i povećanja brojača odrađenih sortiranja, AMR se upućuje na lokaciju koja je levo ili desno od ulazne lokacije, pri čemu se upućivanje robota vrši naizmenično usled ravnomernog opterećenja strane dolaska robota na utovar. Pristizanjem na tu lokaciju AMR-ovi postaju raspoloživi za novi utovar. Sistemom barijera oko ulazne lokacije je omogućeno da je uvek samo po jedan AMR sa svake strane raspoloživ za utovar jer dok ne bude angažovan za utovar on svojim stajanjem na segmentu u kojem je leva/desna lokacija blokira druge da pridu toj lokaciji i time završe svoj aktivni zadatak.

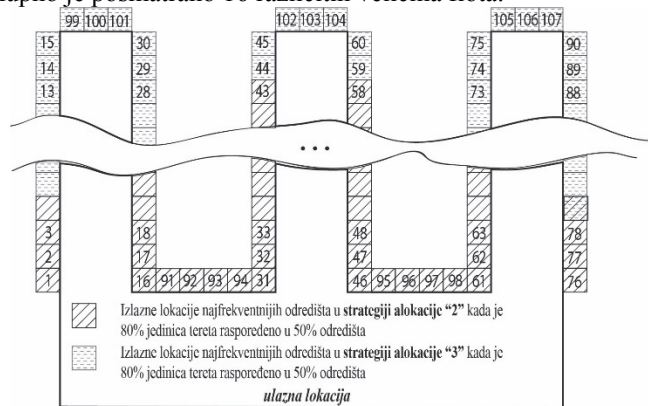
Ponašanje AMR-ova, u smislu redosleda realizacije operacija je realizovano primenom koncepta TaskSequence-i, prikazanom na slici 2b. Pri čemu treba naglasiti da su svi ulazni parametri o postavkama sistema i svih njegovih elemenata definisani primenom odgovarajućih tabela.

#### **4. Postavke simulacionih eksperimenata i dobijeni rezultati**

Koncept simulacionog modela, opisan u prethodnom poglavlju je primenjen na konkretnom primeru sortirnog sistema sa sledećim karakteristikama:

- Osnovni segment layout-a je širok 10.5m i dugačak 5m. Duž šireg dela osnovnog segmenta su na ravnomernom rastojanju smeštena tri uža segmenta dužina 7.5m i širine 1.5m.
- Za sortiranje se koriste AMR-ovi dimenzija 0.48m x 0.38m x 0.2m, a u skladu sa tim su dimenzije segmenata za kretanje robota, korišćenih i u realizaciji A\* ruting algoritma, 0.5m x 0.5m, što je i veličina predviđena za površinu svake izlazne lokacije.
- Na osnovu dimenzija izlaznih lokacija i layout-a sistema omogućeno je pozicioniranje 107 izlaznih lokacija čije pozicije i šema indeksiranja su prikazane na slici 3. Pored toga, na istoj slici je prikazan način alokacije najfrekventnijih odredišta za slučaj strategija „2“ i „3“ u situaciji kada je 80% jedinica robe raspoređeno među 50% odredišta. Usled nepranog broja izlaznih lokacija, lokacija 79 se dodeljuje frekventnijim odredištima u obe strategije.
- Brzina kretanja robota je 3 m/s
- Ubrzanje je takvo da se, zbog elektro motora koji pogone robote, može smatrati da nema gubitaka usled ubrzanja i usporjenja
- Brzina rotacije AMR-ova je 180 °/s
- Roboti obavljaju isključivo ortogonalno kretanje i pri svakoj promeni pravca se zaustavljaju radi rotacije za 90 °
- Vreme za utovar (uključujući i skeniranje, tj. identifikaciju odredišta) je 0.5s

- Vreme istovara tiltovanjem je 1.5s i istovar je jedino moguć na desnu stranu robota, što znači da dolazak robota kome određena lokacija nije sa desne strane podrazumeva okretanje robota za potrebiti ugao, odnosno proporcionalno povećanje vremena istovara.
- Posmatrano je postojanje samo jedne ulazne stanice locirane duž šire ivice osnovnog segmenta suprotno od užih segmenata sistema, kao na slici 3.
- Broj AMR-ova u floti je variran od 10 do 40, sa korakom povećanja od 2 robota, tj. ukupno je posmatrano 16 različitih veličina flota.



Slika 3 Numerisanje izlaznih lokacija i primer njihove alokacije određištima

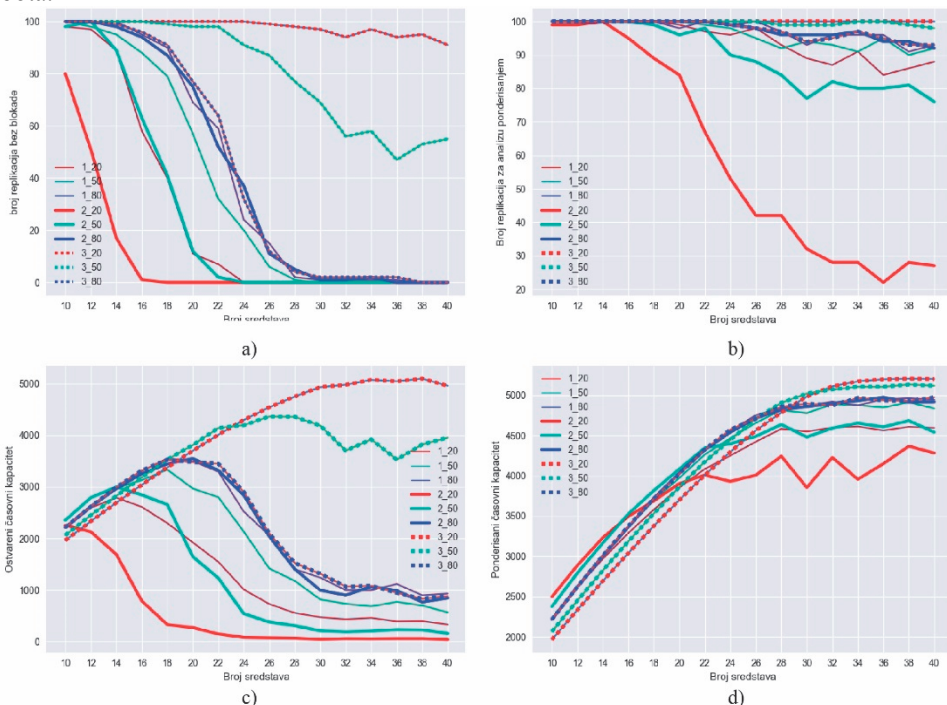
Testnim puštanjem modela je definisano da primena perioda zagrevanja u trajanju od 1h rada dovodi do sigurnog angažovanja svih AMR-ova u sortiranju, odnosno da su u tom trenutku pozicije AMR-ova posledica slučajnosti izazvane određištima jedinica koje AMR-ovi sortiraju do tog trenutka, a koja su slučajna u svakoj realizaciji eksperimenta.

Radi što veće pouzdanosti dobijenih rezultata za svaku od 144 kombinacije ulaznih podešavanja sistema (veličine flote AMR-ova, strategije alokacije i učešća određištima u toku) realizovano je 100 replikacija eksperimenta. Pored podataka o broju realizovanih istovara nakon perioda zagrevanja (slika 4c), a sa ciljem detaljnije analize ponašanja sistema, prikupljeni su i podaci o broju replikacija eksperimenata u kome se nije pojavila blokada rada nekog od AMR-ova, prikazani na slici 4a.

U Flexsim-u pojava blokade nekog AMR-a znači i prestanak rada modela, odnosno kao broj realizovanih istovara se na kraju dobija broj istovara do trenutka blokade. Kako takvi podaci ne obezbeđuju realan uvid u efikasnost rada sistema, usled različitih dužina perioda rada, to je, radi realnijeg poređenja sistema, uveden pojam ponderisanog časovnog kapaciteta sistema. On u suštini, predstavlja kapacitet sistema ostvarenog do trenutka blokade preslikan na 1h rada sistema. Međutim, kako bi krajnje veličine bile u realnim granicama u obzir su uzimane samo one replikacije u kojima je sistem radio duže od neke granične vrednosti. U ovom radu je za graničnu vrednost uzeto minimalno vreme rada od 70s nakon perioda zagrevanja, a broj replikacija koja su ušla u proračun ponderisanog kapaciteta je prikazan na slici 4b. Vrednosti rezultujućeg ponderisanog kapaciteta su prikazane na slici 4d.

Iz rezultata simulacije prikazanih na graficima na slici 4 može se jasno primetiti intenzivno prisustvo blokada u realizaciji eksperimenata, odnosno neadekvatnost primene A\* rutinog algoritma integrisanog u Flexsim radu AMR-ova u posmatranom layout-u.

Međutim, bez obzira na znatno prisustvo blokada, iz rezultata se takođe može zaključiti da je strategija alokacije „3“, tj. ona u kojoj se najfrekventnija odredišta lociraju na izlazne lokacije najudaljenije od ulazne lokacije, pokazala najveću otpornost na pojavu blokada. Drugim rečima, duže vreme realizacije sortiranja svakog AMR-a je nadomešteno manjim čekanjem na završetak istovara drugih robota duž dugih segmenata. Ova tvrdnja važi ne samo za broj replikacija eksperimenta bez blokada (slika 4a), već i za trenutke pojave blokade, odnosno broj replikacija u kojima se blokada javila nakon 70 sekundi rada u stacionarnom režimu jer se na slici 4b jasno vidi da strategija alokacije „3“, za sve varijante učešća (linije „3\_20“, „3\_50“ i „3\_80“ na grafiku) imaju najmanje replikacija sa blokadom pre granične vrednosti. Drugim rečima, strategija alokacije „3“ se pokazala kao dominantna u odnosu na druge dve strategije u svim kombinacijama veličine flote i učešća frekventnih odredišta. Sa druge strane, u situacijama postojanja malog broja dominantnih odredišta kao apsolutno inferiorna strategija alokacije, bez obzira na veličinu flote, pokazala se strategija u kojoj se odredišta alociraju izlaznim lokacijama najbližim ulaznoj lokaciji. Razlog za to je velika verovatnoća prisustva većeg broja AMR-ova na malom broju lokacija na početku užeg segmenta layout-a, što neminovno vodi blokadi nekog robota.



Slika 4 Rezultati simulacionih eksperimenata

Po pitanju uticaja veličine flote na proizvodnost sistema sa grafika na slici 4d, na kome je isključen uticaj blokade robota, se jasno vidi da povećanje flote utiče na povećanje časovnog kapaciteta do broja od cca. 36 vozila. Međutim, treba imati u vidu da je na tom grafiku pokazan ponderisani kapacitet, tj. kapacitet bez uticaja blokada. Tako da se uzimanjem u obzir i uticaja blokada na kapacitet, tj. respektovanjem stvarno realizovanog



kapaciteta (slika 4c) jasno uočava da se sa povećanjem flote iznad 30 robota dolazi i do znatnog povećanja broja blokada, tj. do ostvarenja identičnog kapaciteta manjim flotama, ili pak do njegove redukcije.

## 5. Zaključna razmatranja

Sortirni sistemi bazirani na primeni AMR-ova, usled prednosti vezanih za jednostavnost uvođenja/isključenja robota, brzinu realizacije projekta i redukovane prostorne zahteve predstavljaju veoma perspektivnu alternativu trenutno tržišno dominantnijim konverejским sortirnim sistemima. Obzirom da se radi o novoj tehnologiji koja do skora nije bila predmet naučnog interesovanja, u smislu rešavanja tipičnih upravljačkih problema, to je jasno da je razvoj praktično primenljivih modela i pristupa njihovom rešavanju tek na početku. Ovo je još više izraženo činjenicom da se upravljanje svakim sistemom mora posmatrati u duhu specifičnosti kojima se konkretni sistem karakteriše. U tom smislu, u ovom istraživanju je cilj bio analiza upravljačkih odluka vezanih za primenu strategije alokacije i veličinu flote AMR-ova kojom se dostiže maksimalni časovni kapacitet sistema. Kao alat za modelovanje je korišćena simulacija, konkretno u softverskom paketu Flexsim 2021, i mora se priznati da je simulacija potvrdila svoju univerzalnost i u primeni za analizu ovih sistema. Ono što ipak treba naglasiti je da se A\* rutin algoritam, integrisan u sam simulacioni softver pokazao kao nedovoljno praktičan za rutiranje AMR-ova jer se ispostavilo da nedovoljno efikasno rešava situacije ometanja u kojima nekom od robota preta blokada. Naravno, implementacija algoritma za planiranje ruta iz realnih sistema bi bila najbolje moguće rešenje za prevazilaženje ovog problema. Međutim kako su ti algoritmi poslovna tajna, kao prvi sledeći korak u istraživanju vezanim za upravljanje posmatranim sistemima autori planiraju implementaciju nekog drugog često korišćenog algoritma za definisanje ruta kretanja robota, pre svega D\* i D\* light algoritma.

Po pitanju strategije alociranja odredišta u posmatranom sistemu se kao dominantno pokazalo alociranje frekventnijih odredišta po krajevima užih segmenata. Međutim, u cilju sveobuhvatne analize pravila alociranja potrebno je ispitati mogućnost naizmeničnog lociranja visoko i nisko frekventnih odredišta duž užih segmenata. Ovakav pristup spada u probleme kombinatorne optimizacije i njegova implementacija podrazumeva primenu nekog optimizacionog modela za rešavanje takvih problema, ali i unapred poznatu strukturu robe po odredištima na osnovu koje se definiše raspored odredišta po izlaznim lokacijama, tako da se minimizuje broj frekventnih odredišta koja su bliska jedna drugima i time utiču na povećano ometanje robota u njihovoj blizini.

Konačno, još jedan pravac mogućeg istraživanja posmatranog problema je utvrđivanje performansi sortirnog sistema za slučaj kada postoji više ulaznih stanica. Takva struktura ulaza robe u sistem bi mogla da utiče na povećanje kapaciteta sistema, ali ujedno otvara i nove upravljačke probleme, kao što je definisanje ulazne stanice na koju se AMR upućuje nakon istovara, te je svaki takav sistem potrebno modelirati i utvrditi njegovu ponašanje pod datim uslovima funkcionisanja.

## Literatura

- [1] R. Siegwart, I. Reza Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press, 2011.

- [2] D. McNulty, A. Hennessy, M. Li, E. Armstrong, and K. M. Ryan, “A review of Li-ion batteries for autonomous mobile robots: Perspectives and outlook for the future,” *Journal of Power Sources*, vol. 545, p. 231943, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231943.
- [3] G. Fragapane, R. de Koster, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, “Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda,” *European Journal of Operational Research*, vol. 294, no. 2, pp. 405–426, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2021.01.019.
- [4] Europe’s Biggest Robotic Parcel Sorting System Goes Live. Accessed: Jun. 10, 2023. [Online]. Available: <https://fmindustry.com/2023/04/06/europes-biggest-robotic-parcel-sorting-system-goes-live/>
- [5] M. Marklund and J. Laguna, *Business Process Modeling, Simulation and Design*, 3rd Ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018. doi: 10.1201/9781315162119.
- [6] D. Kelton, R. Sadowski, and N. Zupick, *Simulation with Arena*, 6th Ed. NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [7] J. Banks, J. Carson, B. Nelson, and D. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 5th Ed. Pearson Education Limited, 2014.
- [8] M. De Ryck, M. Versteyhe, and F. Debrouwere, “Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 152–173, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.12.002.
- [9] C. Mahulea, M. Kloetzer, and R. Gonzalez, *Path Planning of Cooperative Mobile Robots Using Discrete Event Models*, 1st edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2019.

**Abstract:** *The intensive technological development of hardware and software has led to a significant increase of use of autonomous mobile robots in internal goods flows. An efficient sorting system is a prerequisite for successful distribution of goods and it must be based on the best possible control decisions. In that sense, this research analyzed the operation of a sorting system with a predefined layout, based on the use of autonomous mobile robots. We considered the operation of the system under three rules for allocating goods’ destinations to the output locations, three structures of goods’ destinations in input flow, and different fleet sizes. The system was modeled using simulation models developed in the Flexsim software, and the analysis of the results provided a deeper insight into the expected behavior of the considered system.*

**Keywords:** *autonomous mobile robots, simulation, sorting systems, allocation*

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF ALLOCATION STRATEGIES AND  
AUTONOMOUS MOBILE SORTING ROBOT FLEET SIZE ON SYSTEM  
PRODUCTIVITY BY FLEXSIM’S SIMULATION MODEL**

Nenad Bjelić, Nemanja Golubović